Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 3, Fall 2023, p. 265-284

Study of Changes in Long-term Wheat Production Trend and Factors Affecting it in North Khorasan Province: I- Irrigated Wheat

M. Jahan[1*], M. Farhadi[2], M. Bannayan[1], M. H. Fallah[2], F. Yaghoubi[2]

Received: 11 August 2022 Revised: 03 October 2022 Accepted: 12 October 2022	**How to cite this article:** Jahan, M., Farhadi, M., Bannayan, M., Fallah, M. H., & Yaghoubi, F. (2023). Study of Changes in Long-term Wheat Production Trend and Factors Affecting it in North Khorasan Province: I- Irrigated Wheat. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(3), 265-284. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78172.1192

Introduction

One of the main challenges of modern agriculture in ensuring food security is development of strategies to deal with potential negative impacts and adapt to climate change. To address this challenge, it is crucial to investigate the effects of climatic factors on agricultural production at a spatiotemporal dimension, develop and utilize crop management decision-support tools, and support targeted agronomic research and policy. These endeavors necessitate the availability of accurate and standardized meteorological data.

Studying growth degree days and wheat phenology can significantly enhance our understanding of how wheat growth responds to climate change and aid farmers in adapting to and effectively mitigating its influence.

Materials and Methods

To determine the environmental and management factors affecting the yield of irrigated and rainfed wheat in different regions of North Khorasan province, we investigated the trend of yield changes from 1980 to 2009. Subsequently, we simulated the wheat plant growth stages using the DSSAT model and analyzed the impact of temperature and rainfall changes on yield through panel data analysis. Panel data analysis is a widely used statistical method in social science, epidemiology, and econometrics for analyzing two-dimensional (typically cross-sectional and longitudinal) panel data. This method involves collecting data over time from the same individuals and conducting regression analysis across these two dimensions.

Results and Discussion

According to the results of this study, 63% of the changes in irrigated wheat yield between the years 1980-2009 can be attributed to environmental factors (temperature and precipitation), while 37% can be attributed to management factors. When comparing environmental parameters, it was observed that the number of temperatures above 30°C (N30TMAX), mean temperature (GSTMEAN), interaction of amount and frequency of precipitation (TPRAT * NPRAT) significantly affect yield ($p \leq 0.05$). Bojnord, Shirvan, and Esfarayen regions exhibited significant positive cross-sectional effects in terms of environmental parameters, whereas Farooj, Raz-Jargalan, Maneh Semelghan, and Jajarm regions displayed negative cross-sectional fixed effects.

A study examining the critical stages of wheat growth during good years (with high wheat grain yield) and poor years (with low wheat grain yield) revealed that in all weak years, the minimum temperatures fell below the critical level (-11°C). The occurrence of very low temperatures during the early stages of growth and primary leaf production, which is the plant establishment stage, resulted in reduced photosynthesis levels and subsequently severe yield reduction.

In all regions and for 100% of the studied years, irrigated wheat in the grain-filling stage experienced temperatures above 30°C, leading to negative cross-sectional effects in Farooj, Raz-Jargalan, Maneh-Semelghan, and Jajarm. The frequency of temperatures above 30°C during the hard dough stage of irrigated wheat was

1- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Ph.D. in Agroecology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78172.1192

higher than that during the soft dough stage in all regions. Therefore, delaying the planting date from October (the common planting date in the studied areas) would result in conflicts with high temperatures during the soft dough stage and negative temperatures during the primary leaf production stage and plant establishment at the beginning of the growing season, severely reducing yield.

Conclusion

In general, the results of this study demonstrated that implementing effective management methods, particularly selecting the appropriate planting date, can lead to better adaptation of wheat's phenological stages to environmental conditions. This, in turn, has the potential to enhance wheat yield.

Keywords: Climate adaptation, Panel data analysis, Phenology, Simulation model, Yield variability

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۲۸۴-۲۶۵

بررسی تغییرات در روند طولانی‌مدت تولید گندم و عوامل مؤثر بر آن در استان خراسان شمالی: عملکرد گندم آبی

محسن جهان[1]*، معصومه فرهادی[2]، محمد بنایان اول[1]، محمد حسن فلاح[2]، فاطمه یعقوبی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰

چکیده

به‌منظور تعیین عوامل محیطی و مدیریتی بر عملکرد گندم آبی در نواحی مختلف استان خراسان شمالی، روند تغییرات عملکرد در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۸۰ مورد بررسی قرار گرفت. سپس مراحل رشدی و عملکرد گیاه گندم توسط مدل DSSAT، با استفاده از مجموعه داده‌های گریدبندی‌شده AgMERRA شبیه‌سازی شد و اثر تغییرات دما و بارندگی بر عملکرد به‌وسیله آنالیز پنل دیتا مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. طبق نتایج این تحقیق، ۶۳ درصد از تغییرات عملکرد گندم آبی توسط عوامل محیطی (دما و بارندگی) و ۳۷ درصد آن توسط عوامل مدیریتی توضیح داده می‌شوند. دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد، دمای میانگین، برهمکنش میزان و دفعات بارندگی در طول فصل رشد، اثر معنی‌داری بر عملکرد داشتند. طول فصل رشد در تمام مناطق موردمطالعه شیب کاهشی داشت. مطالعه مراحل حساس رشدی طی سال‌های خوب و ضعیف (به‌ترتیب دارای عملکرد بالا و پایین دانه گندم) حاکی از این است که در تمام سال‌های ضعیف، دماهای حداقل، پایین‌تر از حد بحرانی (۱۱- درجه سانتی‌گراد) بودند. در تمامی نواحی و در تمام سال‌های موردمطالعه، گندم در مرحله پر شدن دانه (خمیری نرم و خمیری سخت) با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد مواجه بود، بنابراین هر اندازه که تاریخ کاشت از مهر ماه (تاریخ کاشت رایج در مناطق موردمطالعه) به تعویق افتد، کاهش شدید عملکرد را در پی خواهد داشت. به‌طورکلی، نتایج این تحقیق نشان داد که با به‌کار بستن شیوه‌های مدیریتی مؤثر، به‌ویژه انتخاب تاریخ کاشت مناسب می‌توان در جهت بهبود عملکرد گندم اقدام نمود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز پنل دیتا، تغییرپذیری عملکرد، سازگاری اقلیمی، فنولوژی، مدل شبیه‌سازی

مقدمه

امنیت غذایی یکی از دغدغه‌های مهم جهانی در کنار افزایش جمعیت، تغییر آب و هوایی و کاهش فزاینده منابع محدود طبیعی است. پیش‌بینی‌شده است که در سال ۲۰۵۰، جمعیت کره زمین به ۹/۷ میلیارد نفر برسد، در این شرایط، کاهش خسارات وارده و حفظ سطح تولید مواد غذایی، به اندازه افزایش تولید و بهره‌وری محصولات غذایی دارای اهمیت است (Arun & Ghimire, 2019). گندم (*Triticum aestivum* L.) مهم‌ترین غله در سراسر جهان است و حدود ۲۱ درصد از تولید جهانی غذا را به خود اختصاص می‌دهد (Curtis & Halford, 2014). پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، تقاضا برای محصول گندم ۶۰ درصد افزایش یابد (Nelson, Rosegrant, Koo, & Robertson, 2009).

تغییرات آب و هوایی می‌تواند اثرات شدیدی بر منابع غذایی ایجاد کند، بنابراین یکی از چالش‌های اصلی کشاورزی مدرن برای اطمینان از امنیت غذایی تا سال ۲۰۵۰ و پس از آن، توسعه رهیافت‌هایی برای مقابله با تأثیرات منفی تغییرات آب و هوایی (و اقلیمی) است (Raymundo *et al*., 2018; Eyshi Rezaei & Lashkari, 2019). علی‌رغم پیچیدگی تغییرات منابع غذایی در جهان، شاخص‌های ساده دما در طول فصل رشد و بارندگی، ۳۰ درصد یا بیشتر از تغییرات سالانه متوسط عملکرد جهانی را برای شش محصول عمده توضیح می‌دهند. تأثیر افزایش دما بر عملکرد گندم، جو (*Hordeum vulgare* L.) و ذرت (*Zea mays* L.) در سطح جهان منفی بوده است (Lobell & Field, 2007). تغییرات آب و هوایی تقریباً یک‌سوم (۳۲ تا ۳۹ درصد) از تغییرات عملکرد محصولات زراعی عمده در سطح جهان را توضیح می‌دهند (Ray,

۱- استاد، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- دانش‌آموخته دکترای اگرواکولوژی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78172.1192

(Gerber, Macdonald, & West, 2015). در مقیاس جهانی، بیش از ۲۱ درصد تغییر در عملکرد می‌تواند توسط تغییر در شاخص‌های اگروکلیماتیک توصیف گردد (Iizumi & Ramankutty, 2016). گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی IPCC[1] به‌طور برجسته بر روند سریع گرم شدن زمین تأکید و پیش‌بینی می‌کند که دمای هوا در سطح جهانی، بدون توجه به‌شدت گازهای گلخانه‌ای، تا سال ۲۰۳۰، تقریباً یک درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (Solomon *et al.*, 2007). بنابراین، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و اقدامات سازگارانه برای حفظ سطح فعلی تولید مواد غذایی و همچنین دستیابی به تولید پایدار بسیار مهم است (Sanjani, Bannayan, & Kamyabnejad, 2011). در مواردی که کشاورزان قادر به انجام سازگاری‌های مدیریتی فصل نیستند، انحرافات معنی‌دار از شرایط آب و هوایی مورد انتظار، بر رشد و عملکرد محصول تأثیر گذاشته و پیامدهای مهمی برای امنیت غذایی بر جای می‌گذارد (Arshad & Krupnik, 2016).

مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر تولید گندم در شهرستان مشهد نشان داد که تحت سناریوهای مختلف در دوره زمانی ۱۴۰۰-۱۳۷۹، عملکرد گندم از ۱۳۳۱/۴۵ کیلوگرم در هکتار در سال پایه به ۱۹۵۵/۳۲ کیلوگرم در هکتار در سال هدف تغییر کرد (Boskabadi *et al.*, 2022). رهیافت‌های مدیریتی شامل افزایش مصرف کود نیتروژن، معرفی و به‌کارگیری ارقام جدید محصولات، قابلیت جبران کاهش عملکرد ناشی از تغییر اقلیم را تا اندازه‌ای دارا است، اما با افزایش بیشتر دما، روند عملکرد کاهشی بوده و مقدار این کاهش بسته به موقعیت مکانی و پایه‌های دمایی، مختلف متفاوت خواهد بود (Amjath-Babu, Krupnik, Aravindakshan, Arshad, & Kaechele, 2016; Arshad & Krupnik, 2016). برآورد اثرات تغییرات آب و هوایی بر کشاورزی در حوزه رودخانه زاینده‌رود نشان می‌دهد که در اثر شرایط تشدید گرما و خشکی در آینده، تولید محصولات زراعی به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (۲۰/۷-۲/۵ درصد برای گندم، ۱۷/۲-۱/۴ درصد برای جو، ۹/۵-۲/۱ درصد برای برنج *Oryza sativa* L. و ۱۹/۱-۵/۷ درصد برای ذرت) و دوره رشد گیاه با گرم شدن (حتی زمانی که آب آبیاری کاهش نمی‌یابد و کشاورزان مجاز به جایگزینی آب‌های زیرزمینی با آب‌های زیرزمینی می‌شوند)، کوتاه می‌شود (Gohari *et al.*, 2013). مطالعه تغییرات اقلیمی با استفاده از دماهای حداکثر در استان‌های خراسان شمالی و رضوی در دوره زمانی ۱۵ ساله و ۳۰ ساله قبل از آن، تفاوت معنی‌داری را بین دوره‌های زمانی قبل و بعد از آن نشان داد (Sanjani *et al.*, 2011). در پژوهشی دیگر، متغیرهای اقلیمی شامل بارش و دما برای دوره آماری ۱۷ ساله از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۸ برای بررسی نوسانات عملکرد گندم و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) در ۳ شهرستان خراسان رضوی استفاده شد. در این مطالعه جهت بررسی نوسانات زمانی عملکرد از روش سری‌های زمانی[2] و آزمون مان-کندال[3] و در بعد مکان از دو روش وزن‌دهی عکس فاصله[4] و کریجینگ[5] استفاده گردید و نتایج نشان داد که ۴۰ تا ۷۷ درصد از تغییرات عملکرد گندم را می‌توان به‌وسیله متغیرهای اقلیمی توصیف کرد (Bannayan *et al.*, 2018). در پژوهشی که در مقیاس جهانی انجام شد، میانگین ماهیانه داده‌های اقلیمی، ۳۰ درصد واریانس در عملکرد گندم را توضیح داد و باقی‌مانده واریانس توسط سایر پیش‌برنده‌های محیطی و مدیریتی که در مکان و زمان متغیر بودند، تفسیر شد (Lobell & Field, 2007). پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه نقش عوامل محیطی بر عملکرد، بیانگر همبستگی منفی بین دما و عملکرد است (Asseng, Foster, & Turner, 2011; Arshad & Krupnik, 2016). تحقیقات انجام‌شده بیانگر این است که تولید جهانی گندم به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما، تا ۶ درصد کاهش می‌یابد و نوسانات دمایی فراتر از حد مطلوب، با تغییر در میزان عملکرد در مناطق مختلف زراعی همراه است (Iizumi & Ramankutty, 2016). مطالعه فنولوژی گندم می‌تواند درک محققان و کشاورزان را از نحوه واکنش گندم به تغییرات آب و هوایی تا حد زیادی افزایش دهد و به مقابله منطقی با تأثیرات آن کمک کند (Ruane, Goldberg, & Chryssanthacopoulos, 2015).

تخمین عملکرد و اجزای عملکرد به‌منظور تجزیه‌وتحلیل امنیت غذایی، ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی و آب و هوایی بر تولیدات کشاورزی، توسعه و کاربرد ابزارهای حمایت از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی با هدف پشتیبانی از سیاست‌گذاری‌ها و تحقیقات زراعی، امری ضروری هست. با توجه به اهمیت تغییرات آب و هوایی، ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری اثرات آن توسعه‌یافته است. یکی از راه‌حل‌های کم‌هزینه، دقیق و سریع، استفاده از روش مدل‌سازی و به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی است (Ruane *et al.*, 2015; Nassiri Mahallati & Jahan, 2020; Jahan & Nassiri Mahallati, 2022). از سویی دیگر، مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد، نیازمند داده‌های باکیفیت روزانه هواشناسی در بازه زمانی درازمدت و تاریخی می‌باشند (Van Wart *et al.*, 2015). تقریباً تمامی شاخص‌های اقلیمی کشاورزی بر اساس دو متغیر دما و بارش محاسبه می‌شوند و تغییرات اقلیمی آینده با تأثیر بر این شاخص‌ها، شرایط رشد و نمو گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار خواهند

1- Intergovernmental Panel on Climate Change

2- Time series
3- Mann-Kendall test
4- Inverse distance weighted
5- Kriging

داد (Lashkari, Bannayan, Koochaki, Choi, & Park, 2016). بررسی بارش‌های فصلی در ایران طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۰۶ نشان داده است که میزان بارش‌های فصلی به‌خصوص بهاره برای اکثر مناطق، روند کاهشی معنی‌داری (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد) داشته است (Shifteh somee, Ezani, & Tabari, 2012). همچنین نتایج مطالعات مختلف (از حدود سال ۲۰۰۶) پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر سیستم‌های کشاورزی ایران بیانگر روند کاهشی شدید در عملکرد گیاهان زراعی بوده است (Valizadeh, Ziaei, & Mazloumzadeh, 2014; Koocheki & Nassiri Mahallati, 2016; Bannayan & Eyshi Rezaei, 2012). نوسانات زمانی و مکانی در عملکرد علاوه بر شرایط آب‌وهوا، به دلیل تفاوت در سطح نهاده‌ها و توسعه کشاورزی و خاک است (Bannayan *et al.*, 2018).

بنا بر گزارش‌های رسمی، استان خراسان شمالی ۳۴۴ هزار هکتار عرصه زراعی و باغی دارد (portal.njk.ir, 2020). در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، به علت کاهش نزولات جوی، فقدان بارش مؤثر و سرمازدگی، از ۴۷ هزار و ۷۰۰ هکتار اراضی کشت‌شده گندم آبی و ۹۶ هزار و ۲۵۰ هکتار اراضی کشت‌شده گندم دیم، نیمی از اراضی سطح زیر کشت گندم دیم به‌صورت ۱۰۰ درصد از بین رفت و راندمان عملکرد تولید نیمی دیگر از کشتزارهای باقی‌مانده، به نصف کاهش یافت. بر اساس آمار سازمان جهاد کشاورزی، خشک‌سالی سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ در شهرستان اسفراین باعث شد تا ۵۰۰ هکتار از مزارع گندم رها شوند. تگرگ سال ۱۳۹۱ باعث خسارت ۸۰ تا ۱۰۰ درصدی به مناطق درگیر تگرگ شد. بخشی از این کاهش عملکرد ناشی از عوامل آب و هوایی است که با اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی سازگارانه در قبال هشدارهای هواشناسی، می‌توان تا حدودی آن را کاهش داد. میانگین میزان بارندگی در دوره آماری بلندمدت، ۲۳۴/۳ میلی‌متر گزارش‌شده است که بر این اساس، میزان بارندگی‌ها در سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ نسبت به دوره آماری بلندمدت ۳۸/۷ درصد کاهش داشت. با توجه به این‌که حدود ۴۸ درصد از اراضی کشاورزی به کشت گندم اختصاص دارد و ۵۵ درصد مزارع آبی غلات استان از رودخانه‌ها سیراب می‌شوند، بنابراین، اتخاذ سیاست‌های مدیریتی سازگارانه با تغییرات اقلیمی و آب و هوایی نظیر توسعه سیستم‌های آبیاری نوین، تغییر در تاریخ کاشت، مدیریت مصرف نهاده‌ها و غیره به‌منظور حفظ امنیت غذایی و پایداری اقتصاد کشاورزان ضروری به نظر می‌رسد.

در تحقیق حاضر فرض بر این است که شیوه‌های مدیریتی، عوامل اقلیمی، منابع آبی و خاکی بر نوسان تولید در مناطق مختلف به‌طور یکسانی تأثیرگذار هستند و نوسانات در عوامل محیطی (اقلیمی)، تأثیر بیشتری بر نوسان عملکرد گیاهان دارند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر عوامل مدیریتی و عوامل محیطی بر عملکرد گندم آبی در استان خراسان شمالی هست. به‌عبارت‌دیگر، نوسان عملکرد مشاهده‌شده در نواحی مختلف استان و در بازه زمانی ۳۸ ساله (۲۰۱۷-۱۹۸۰) تا چه اندازه تحت تأثیر عوامل محیطی، مدیریتی و یا هر دو آن‌ها بوده است. همچنین، تعیین این‌که کدام‌یک از عوامل مدیریتی یا محیطی در نوسان و تغییر روند تولید گندم، نقش بیشتری داشته است، از اهداف دیگر این پژوهش هست.

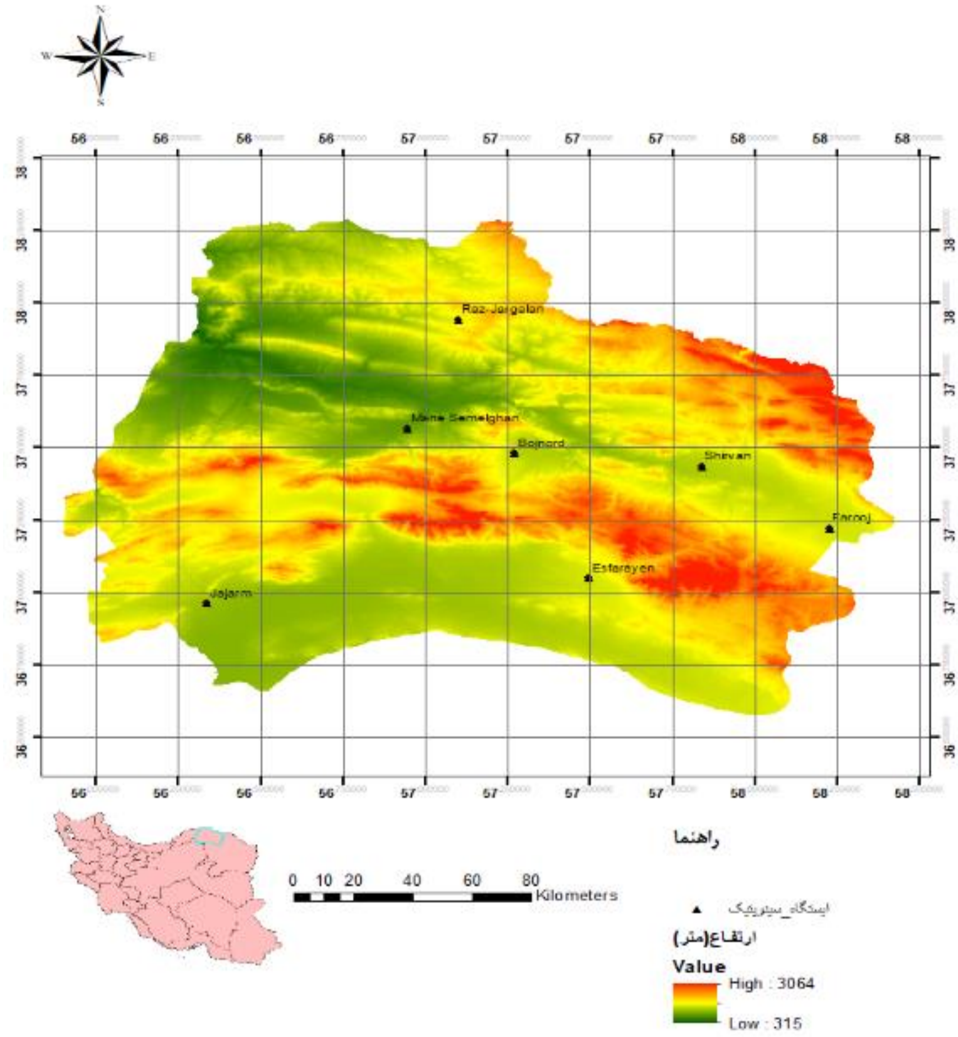
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، استان خراسان شمالی با مساحتی حدود ۲۸۱۷۹ کیلومترمربع است که در مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این منطقه با آب‌وهوای متنوع و غالباً معتدل کوهستانی در ارتفاع متوسط ۱۳۲۶ متر از سطح دریا واقع شده است. این مطالعه در سطح هفت ناحیه/شهرستان (بجنورد، شیروان، فاروج، اسفراین، جاجرم، راز-جرگلان و مانه سملقان) در قالب گریدهای ۲۵ × ۲۵ کیلومتر انجام شد.

داده‌ها و اطلاعات موردنیاز

اطلاعات آب و هوایی: تشعشع خورشیدی روزانه (مگاژول بر متر مربع)، حداکثر و حداقل دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، بارندگی روزانه (میلی‌متر) از پایگاه داده AgMERRA[1] اخذ گردید. مجموعه داده‌های AgMERRA در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ با فرمت NetCDF از آدرس الکترونیکی پایگاه اطلاعاتی NASA[2] بارگیری و پس از تعیین موقعیت هر ایستگاه در گرید، داده‌های آن گرید با استفاده از بسته ncdf4 نرم‌افزار R، استخراج گردید (Bosilovich *et al.*, 2015). داده‌های ایستگاهی برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ فقط برای دو شهرستان بجنورد و اسفراین موجود بود که از اداره کل هواشناسی استان اخذ گردید. از داده‌های مشاهداتی روزانه هفت ایستگاه سینوپتیک واقع در شهرستان‌های اسفراین، بجنورد، شیروان، فاروج، مانه سملقان، راز جرگلان و جاجرم شامل دمای حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و بارش در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ به‌منظور ارزیابی داده‌های AgMERRA و امکان‌سنجی استفاده از آن در استان خراسان شمالی استفاده شد. موقعیت جغرافیایی و برخی متغیرهای آب و هوایی هرکدام از ایستگاه‌ها در شکل ۱ آورده شده است.

1- The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications
2- The National Aeronautics and Space Administration



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک خراسان شمالی در گریدهای ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه

Figure 1- Location of North Khorasan synoptic stations in grids of 0.25 x 0.25 degrees

اطلاعات مربوط به خاک: اطلاعات خاک شامل بافت خاک، ساختمان خاک، عمق نفوذ ریشه و میزان هدایت الکتریکی داده‌های خاک از پایگاه جهانی اطلاعات خاک (ISRIC[1]) دریافت و توسط نرم‌افزار ArcGIS استخراج شد. این اطلاعات با قدرت تفکیک ۰/۵ × ۰/۵ درجه، برای کل جهان قابل دانلود است. این پایگاه داده شامل ۱۱۲۵ پروفیل خاک (با قدرت تفکیک ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه) توزیع‌شده در سراسر جهان است که با توجه به سیستم فائو، زمین مرجع و طبقه‌بندی‌شده است (Batjes Niels, 2012).

اطلاعات مدیریت زراعی: اطلاعات مدیریت زراعی شامل رقم، تاریخ کاشت، عمق کاشت، نوع و میزان نهاده‌ها از کارشناسان و خبرگان محلی اخذ گردید. میانگین عملکرد تاریخی گندم آبی و دیم از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ در شهرستان‌ها (تا حد ممکن و در دسترس) و نیز میزان نهاده‌های توزیع‌شده در استان (کود، بذر و غیره) و درجه مکانیزاسیون از گزارش‌های رسمی و بایگانی سازمان جهاد کشاورزی، مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان‌ها و صندوق بیمه بانک کشاورزی استخراج شد.

ارزیابی داده‌های آب و هوایی: شرح جزئیات نتیجه ارزیابی داده‌های آب و هوایی و توانایی AgMERRA در پر کردن خلاء ناشی از کمبود یا فقدان داده‌های تاریخی ایستگاهی در استان خراسان شمالی توسط فرهادی و همکاران (Farhadi, Jahan, &

1- World Soil Information (http://www.isric.org)

(Bannayan, 2021) بیان شده است. قابلیت اطمینان بالای داده‌های AgMERRA برای به‌کارگیری در پژوهش‌هایی شبیه به مطالعه حاضر، توسط محققان متعدد گزارش‌شده است (Lashkari et al., 2016; Yaghoubi, Bannayan, & Asadi, 2020).

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

مدل‌سازی رشد و نمو گیاهی

به‌منظور تعیین اثر عوامل اقلیمی و مدیریتی بر عملکرد گندم، نمودار روند عملکرد مشاهداتی تاریخی هر شهرستان به‌طور جداگانه تهیه و موردبررسی قرار گرفت. روند تغییرات عملکرد در درازمدت ناشی از عوامل مدیریتی و نوسانات سال‌به‌سال آن در اثر تغییرات آب و هوایی به‌وجود می‌آید، لذا تعیین شیب خط برازش بر منحنی تغییرات عملکرد، بیانگر میزان تأثیر عوامل مدیریتی در طول زمان است. برای بررسی رفتار رشد گیاه در اثر عوامل محیطی تنش‌زا، شبیه‌سازی مراحل رشد گندم در کشت پاییزه، با مدل CROPSIM-CERES[1] موجود در بسته نرم‌افزاری DSSAT 4.7 انجام شد. بسته نرم‌افزاری سیستم حمایت از تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری کشاورزی (DSSAT[2]) یک سیستم پشتیبانی جامع است (Hoogenboom et al., 2010). مدل‌های شبیه‌سازی زراعی، دانش و نوآوری رشته‌های مختلف زیست‌شناسی، فیزیک و شیمی را در رابطه با سیستم‌های تولیدات کشاورزی با یکدیگر تلفیق می‌کنند، ازاین‌رو می‌توانند درک و مدیریت سیستم‌های کشاورزی را به‌صورت جامع افزایش دهند (Bannayan et al., 2007; Soler, Sentelhas, & Hoogenboom, 2007; Andarzian et al., 2008). این مدل، رشد و نمو گیاه را در مقیاس زمانی روزانه شبیه‌سازی می‌نماید. در این مطالعه از ضرایب ژنتیکی گندم آبی (پیشتاز) که پیش‌تر کالیبره و ارزیابی‌شده‌اند برای اجرای مدل استفاده شد (Fallah, Nezami, Khazaie, & Nassiri Mahallati, 2021). شاخص‌های آماری که برای ارزیابی و مقایسه نتایج داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌شده توسط مدل با داده‌های واقعی مورداستفاده قرار گرفت شامل جذر میانگین مربعات خطا (*RMSE*)[3]، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (*NRMSE*)[4]، مربع ضریب همبستگی پیرسون یا ضریب تبیین (R^2)[5] و شاخص توافق (*d*)[6] بود (Willmott et al., 1985).

بررسی اثر متغیرهای اقلیمی

برای تعیین نقش عوامل محیطی دما و بارندگی به‌عنوان دو متغیر تأثیرگذار بر عملکرد (Bannayan et al., 2010)، از آمار واقعی و مشاهداتی عملکرد استفاده شد و سال‌هایی که عملکرد خوب و ضعیف داشتند، ازنظر برخی صفات موردبررسی قرار گرفتند. این صفات شامل طول فصل رشد، میزان و پراکنش بارندگی در طول فصل رشد، میزان و پراکنش بارندگی‌ها در مرحله تورم سنبله تا انتهای مرحله خمیری نرم (مرحله ۴۰ تا ۸۰ تقسیم‌بندی زادوکس) (Poole, 2005)، تعداد وقوع دماهای بالاتر از $30^{\circ}C$ در طول فصل رشد و در مرحله گلدهی، دماهای حداقل، حداکثر و میانگین در طول فصل رشد بودند که برای هر منطقه و به‌صورت سالیانه (برحسب آمار در دسترس هواشناسی، در بازه زمانی ۳۰ تا ۳۸ ساله) در نرم‌افزار اکسل ثبت شد. به‌منظور تعیین اثر عوامل محیطی بر عملکرد، در یک دوره زمانی ۳۰ ساله در مناطق مختلف استان، از روش آنالیز پنل دیتا[7] و نرم‌افزار EViews نسخه ۱۰ استفاده گردید (Lobell & Burke, 2010).

روش آنالیز پنل دیتا

به‌منظور تجزیه‌وتحلیل میزان عملکرد گندم تحت تأثیر متغیرهای آب و هوایی (دما و بارندگی) در طول زمان و در مکان‌های مختلف، از آنالیز پانل دیتا استفاده شد که در واقع ترکیب سری‌های زمانی و مکانی است.

$$Y_{it} = \beta X_{it} + \alpha Z_i + \epsilon_{it} \quad (۱)$$

در مدل فوق، Y متغیر وابسته، X متغیر مستقل، ϵ، خطا در مکان i و در زمان t هستند و Z_i نیز متغیری است که خصوصیات ویژه هر مکان (ناهمگنی‌های مقاطع) یا هر منطقه را نشان می‌دهد. اگر Z_i فقط شامل یک جمله ثابت باشد که برای همه گروه‌ها یکسان است، در این صورت معادله به‌صورت زیر خواهد شد:

$$Y_{it} = \beta X_{it} + \alpha + \epsilon_{it} \quad (۲)$$

در این حالت، مدل تجمیعی یا پولد است (ناهمگنی‌های مقاطع معنی‌دار نیستند و در مدل حضور ندارند). در این حالت رگرسیون، عرض از مبدأ مشترک (آلفای مشترک) برای تمام مقاطع (تمام مناطق یا مکان‌ها) در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین این‌که آیا اثرات تجمیعی (پولد) هستند یا ثابت (پانل) از آزمون اف لیمر استفاده می‌شود. اگر در مدل بین مقاطع مختلف تفاوت معنی‌دار وجود داشته باشد و Z_i با X_i (متغیرهای مستقل در سمت راست مدل) همبستگی داشته باشد، در این صورت برای هر گروه یک عرض از مبدأ (α_i) خواهیم داشت که معادله آن عبارت است از:

$$Y_{it} = \beta X_{it} + \alpha_i + \epsilon_{it} \quad (۳)$$

در این‌جا $\alpha_i = \alpha Z_i$ است که تمام اثرات قابل‌مشاهده را در

1- Cropping System Model-Crop Environment Resource Synthesis
2- Decision Support System for Agro-technology Transfer
3- Root Mean Square Error
4- Normalized Root Mean Square Error
5- Coefficient of Determination
6- Index of Agreement
7- Panel Data Analysis

بردارد و بیانگر یک میانگین شرطی قابل تخمین می‌باشد. در این رویکرد که به آن مدل با «اثرات ثابت» می‌گوییم به هر گروه یک مقدار ثابت مانند α_i اختصاص داده می‌شود.

آزمون اف لیمر یا لیمر-چاو

آزمون اف لیمر یا لیمر-چاو برای تعیین اثرات تجمیعی (پولد- pooled) یا اثرات (پانل) انجام می‌شود. فرض‌های صفر و جایگزین در این آزمون به شرح زیر هستند:

H_0: عرض از مبدأ تمام مقاطع یکسان است.

H_1: حداقل یک مقطع عرض از مبدأ متفاوت دارد.

$$\begin{cases} H_0: \alpha_i = \alpha \\ H_1: \alpha_i \neq \alpha \end{cases}$$

در این آزمون فرضیه H_0 یعنی یکسان بودن عرض از مبداءها در مقابل فرضیه H_1 یعنی ناهمسانی عرض از مبداءها قرار می‌گیرد. درصورتی‌که فرضیه H_0 پذیرفته شود به معنی یکسان بودن شیب‌ها برای مقاطع مختلف بوده و قابلیت ترکیب شدن داده‌ها و استفاده از مدل رگرسیون ترکیب‌شده مورد تأیید آماری قرار می‌گیرد و فرضیه‌های پژوهش با استفاده از روش داده‌های ترکیب‌شده مورد آزمون قرار خواهد گرفت. اما در صورت رد فرضیه H_0 روش داده‌های پانل پذیرفته می‌شود و فرضیه‌های پژوهش با استفاده از روش داده‌های پانل آزمون می‌شود.

نتایج و بحث

بررسی روند تغییرات عملکرد دانه گندم تحت تأثیر عوامل محیطی و مدیریتی

به‌منظور بررسی روند تغییرات عملکرد و تعیین اثر عوامل محیطی و مدیریتی بر آن، رشد و عملکرد گندم آبی شبیه‌سازی شد و سپس با عملکرد گزارش‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. معادله رگرسیون عملکرد محصول در سال‌های متوالی نشان‌دهنده روند تغییرات عملکرد در طی زمان است و شیب آن تغییرات سالانه عملکرد را در طی دوره زمانی تحت بررسی مشخص می‌سازد که حاصل انواع روش‌های مدیریت (به‌زراعی و به‌نژادی) است (Cassman, 1999). باقی‌مانده این معادله رگرسیون یعنی اختلاف بین عملکردهای واقعی و پیش‌بینی‌شده در هر سال، نشان‌دهنده تاثیر شرایط محیطی (آب و هوایی) بر عملکرد بوده و شاخصی از ثبات عملکرد محسوب می‌شود (Calderini & Slafer, 1998). بنابراین، روند تغییرات عملکرد در درازمدت بیانگر تأثیر عوامل مدیریتی است و نوسانات سال‌به‌سال آن، به دلیل تغییرات آب و هوایی می‌باشد. درنهایت سال‌هایی که دارای عملکرد خوب و ضعیف بودند ازلحاظ مراحل حساس رشدی و وقوع تنش دمایی و بارندگی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

ازآن‌جاکه بخش عمده مزارع گندم شهرستان بجنورد درگریدهای شماره ۱۰۹ (شهر بجنورد، خداقلی، آبچور، کی کی، اسدلی، قاپاق، بیدک، کهنه کند، شاقه، ینگه قلعه، مهنان و غیره) و ۱۱۰ (نوده، چناران، پیغو، پاکتل و غیره) واقع‌شده‌اند، بنابراین، تجزیه‌وتحلیل‌های مربوط به بجنورد بر روی اطلاعات این دو محدود انجام گرفت. به‌منظور بررسی تأثیر عوامل محیطی بر عملکرد گندم آبی، شبیه‌سازی مراحل رشدی گندم در بجنورد (طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ توسط مدل DSSAT انجام شد. ضریب تبیین مقادیر عملکرد مشاهداتی با عملکرد پیش‌بینی‌شده گندم آبی در شهرستان بجنورد برابر با R^2=۰/۷۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده قابلیت مناسب مدل در پیش‌بینی عملکرد است، اگرچه برای مقادیر بیشتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد برآورد شده توسط مدل، کمتر از مقادیر واقعی بودند (شکل ۲). مقدار nRMSE=20.77 مدل نشان‌دهنده این است که شبیه‌سازی به‌خوبی صورت گرفته است. چنانچه مقدار nRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی خواهد شد. مقدار شاخص توافق ویلموت (d) برای مدل ۰/۹۹ به‌دست آمد که هرچه مقدار d به‌دست‌آمده توسط مدل به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است میزان پیش‌بینی صفت را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده‌شده انجام دهد (Willmott *et al*., 1985).

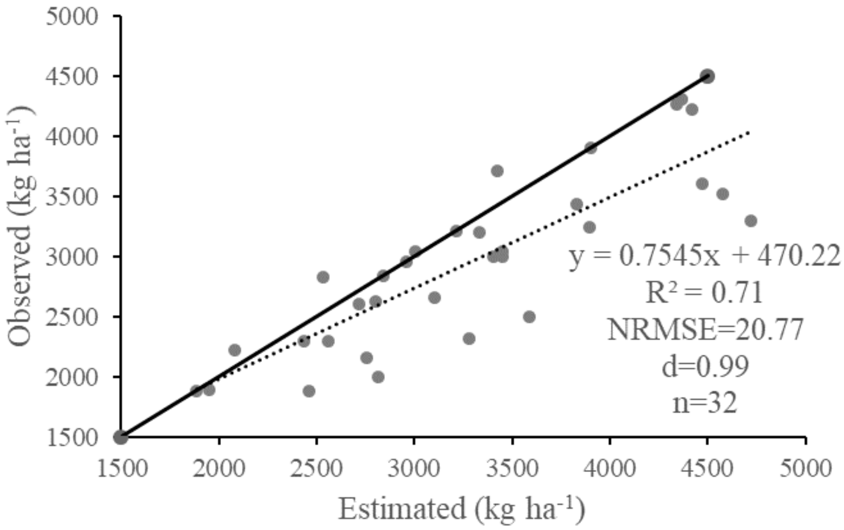
روند تغییرات میانگین عملکرد دانه و عوامل محیطی (بجنورد)

در شهرستان بجنورد، میانگین عملکرد گندم آبی در طول ۳۸ سال (سال ۲۰۱۷-۱۹۸۰)، شیب افزایشی بسیار ملایم داشت که ناشی از عوامل مدیریتی است (شکل ۳). به‌عبارت‌دیگر، اقداماتی شامل تأمین نهاده‌هایی از قبیل کود شیمیایی، بذر اصلاح‌شده، ماشین‌آلات و ادوات خاک‌ورزی، بهبود انتقال اطلاعات و ضریب نفوذ دانش در مزرعه برای گندم آبی، باعث افزایش عملکرد به میزان ۱۲/۶۳ کیلوگرم در هر سال شد (شکل ۳) که سهم مدیریت در این افزایش عملکرد، ۰/۴۸ درصد بوده است (معادله ۲).

$$Y = a + b X \quad (۱)$$

$$Z = ۱۰۰ b/a \quad (۲)$$

در معادله‌های (۱) و (۲)، Y عملکرد، a عرض از مبدأ، b شیب خط (ضریب رگرسیون) و Z درصد افزایش است.

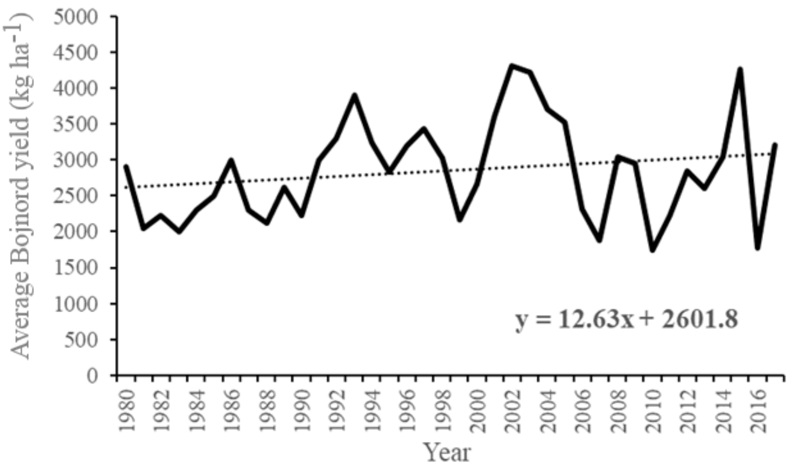


شکل ۲- مقایسه میانگین عملکرد مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده گندم آبی در بجنورد

خط مشکی پررنگ، خط ۱:۱، و خط نقطه‌چین، خط رگرسیون است.

Figure 2- Comparison of observed and predicted average yield of irrigated wheat in Bojnord

The bold line and dotted line represent the 1:1 line and the regression line, respectively.



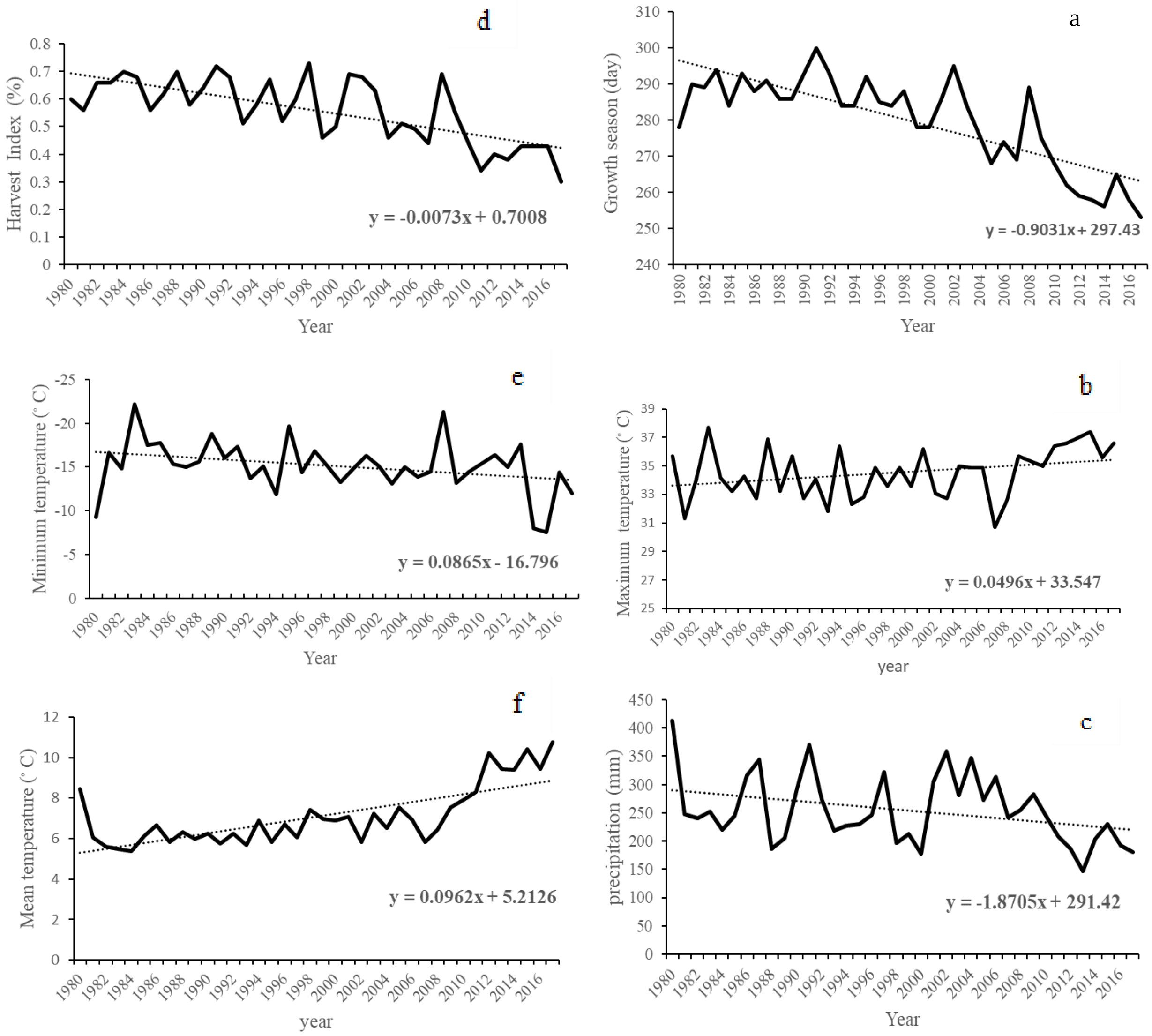
شکل ۳- روند تغییرات میانگین عملکرد دانه گندم آبی در شهرستان بجنورد طی سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۰

خط پیوسته میانگین سالانه و خط نقطه‌چین، خط رگرسیونی را نشان می‌دهد.

Figure 3- The trend of changes in the average yield of irrigated wheat in Bojnord during the years 1980-2017

Bold and dotted lines indicate the annual average and regression line, respectively.

بررسی عوامل محیطی در طی فصل رشد در ناحیه بجنورد (گرید ۱۰۹) بیانگر آن بود که بارندگی در طی ۳۸ سال گذشته، روندی کاهشی به میزان ۱/۸ میلی‌متر در هر سال داشته است (شکل ۴ c). دماهای حداکثر (شکل ۴ b)، حداقل (شکل ۴ e) و میانگین (شکل ۴ f) به‌ترتیب ۰/۰۴۹، ۰/۰۸۶، ۰/۰۹۶ درجه سانتی‌گراد در هرسال افزایش داشته‌اند. کاهش بارندگی و به‌طور هم‌زمان افزایش دما باعث شده تا طول فصل رشد گندم آبی به‌منظور فرار از شرایط نامساعد محیطی اندکی کاهش یابد (حدود یک روز در هر سال) (شکل ۴ a). شاخص برداشت (HI) که حاصل تقسیم عملکرد اقتصادی (عملکرد دانه) به عملکرد بیولوژیک (عملکرد دانه و کاه و کلش) هست شیب کاهشی داشت (شکل ۴ d). به نظر می‌رسد که روند افزایشی دما و وزش بادهای گرم در دوره پر شدن دانه، باعث کاهش عملکرد دانه در مقایسه با عملکرد بیولوژیک و درنتیجه کاهش شاخص برداشت شد.



شکل ٤- روند تغییرات متغیرهای محیطی (طول فصل رشد (a)، دمای حداکثر (b)، بارندگی (c)، شاخص برداشت گندم آبی (d)، دمای حداقل (e) و دمای میانگین (f)، در شهرستان بجنورد، گرید ۱۰۹) طی سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۰

خط پیوسته میانگین سالانه و خط نقطه‌چین، برازش رگرسیونی را نشان می‌دهد.

Figure 4- Changes in environmental variable (the growing season length, a; maximum temperature, b; precipitation, c; harvest index, d; minimum temperature, e; mean temperature, f) of irrigated wheat in Bojnord, Grid 109) during the years 1980-2017

Bold and dotted lines indicate the annual average and regression line, respectively.

متغیرهای اقلیمی در دوره رشد گندم آبی، در دو گرید ۱۰۹ و ۱۱۰ که اکثریت مزارع آبی شهرستان بجنورد در آن‌ها واقع‌شده‌اند، استخراج و شکل‌های مربوط به آن رسم شد. مقایسه مقادیر جدول ۱ و شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهد که فصل رشد طولانی‌تر (۲۹۵ روز در مقابل ۲۶۹ روز)، میزان و دفعات بارندگی در طول فصل رشد (۳۵۹/۴ میلی‌متر در ۵۹ نوبت، در مقابل ۲۴۲/۴ میلی‌متر در ۴۹ نوبت)، میزان و دفعات بارندگی‌ها در مرحله تورم سنبله تا انتهای خمیری نرم (۳۶/۱ میلی‌متر در ۵ نوبت در مقابل ۱۳ میلی‌متر در ۳ نوبت)، افزایش دماهای حداقل در دوره تولید برگ‌های اولیه و استقرار گیاه (۱۵/۱- درجه سانتی‌گراد در مقابل ۲۱/۲۹- درجه سانتی‌گراد)،

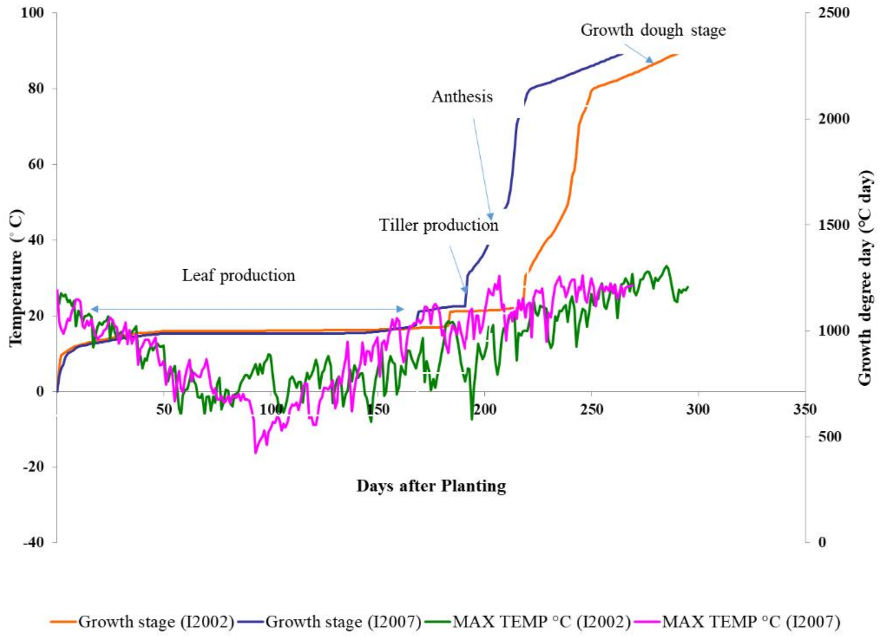
هوای خنک در دوره گلدهی که مرحله‌ای حساس نسبت به دماهای بالا هست (۱۱/۸۹ درجه سانتی‌گراد در مقابل ۲۲/۱ درجه سانتی‌گراد) به‌ترتیب باعث افزایش شاخص برداشت (۰/۶۸ در مقابل ۰/۳۹) و درنتیجه میانگین عملکرد سال ۲۰۰۲ نسبت به سال ۲۰۰۷ شد. بر اساس میزان عملکرد دانه، سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۷ به‌ترتیب به‌عنوان سال خوب و سال ضعیف در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ در نظر گرفته شدند. اگرچه تعداد دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۲ نسبت به سال ۲۰۰۷ بیشتر بوده (۱۱ مورد در مقابل ۳ مورد)، اما به دلیل زمان وقوع آن‌که در اواخر مرحله خمیری سخت بود، باعث کاهش عملکرد در سال ۲۰۰۲ نشد (شکل ۵). گندم به‌ویژه به تنش گرمایی حساس است. قرار گرفتن در معرض دمای بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند به سیستم فتوسنتزی آسیب رسانده، روند پیری را تسریع کرده و درنتیجه دوره پر شدن دانه را کاهش دهد که به‌نوبه خود به کاهش عملکرد می‌انجامد (Asseng *et al.*, 2011).

بررسی مقادیر جدول ۲ نشان می‌دهد که فصل رشد طولانی‌تر (۲۸۴ روز در مقابل ۲۵۹ روز)، پراکنش و میزان بارندگی در طول فصل رشد (۳۳۵/۵ میلی‌متر با تعداد دفعات بارندگی۶۱ در مقابل ۱۷۸/۴ میلی‌متر با تعداد دفعات بارندگی ۴۸) و در مرحله تورم سنبله تا پایان خمیری نرم (۴۶/۱ میلی‌متر با تعداد دفعات بارندگی ۷ در مقابل ۱۵/۳۹ میلی‌متر با تعداد دفعات بارندگی ۳)، افزایش دماهای حداقل در دوره تولید برگ‌های اولیه و استقرار گیاه (۱۲/۸- درجه سانتی‌گراد در مقابل ۱۹/۶- درجه سانتی‌گراد) دماهای پایین‌تر در دوره گلدهی که از مراحل حساس به دماهای بالا هست (۲۲ درجه سانتی‌گراد در مقابل ۲۸/۶ درجه سانتی‌گراد) به‌ترتیب باعث افزایش شاخص برداشت (۰/۵۶ در مقابل ۰/۳۷) و درنتیجه افزایش میانگین عملکرد در سال ۲۰۰۲ نسبت به سال ۲۰۰۷ شد.

جدول ۱- مقایسه متغیرهای محیطی مؤثر بر عملکرد گندم آبی بجنورد (گرید ۱۰۹) در سال‌های خوب و ضعیف طی دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۰

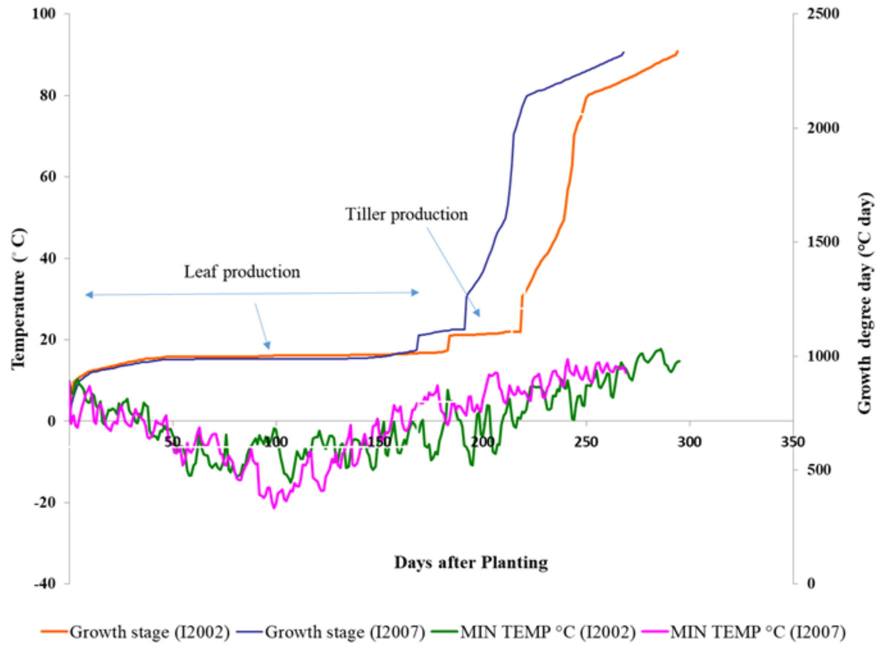
Table 1- Comparison of environmental variables affecting wheat yield in Bojnord (Grid 109) in the good (2002) and the weak (2007) years about grain yield during 1980-2017

Environmental variable/ wheat growth characteristics متغیر محیطی/ ویژگی رشدی گندم	2002 (Good) سال خوب	2007 (Weak) سال ضعیف
Amount of precipitation (mm) during booting to the end of grain milk stage مقدار بارندگی از زمان تورم سنبله تا پایان خمیری نرم	36.1	13
Number of precipitations during booting to the end of grain milk stage تعداد دفعات بارندگی از زمان تورم سنبله تا پایان خمیری نرم	5	3
Amount of precipitation in the flowering phase (mm) میزان بارندگی در فاز گلدهی	0	0
Number of precipitation s during the growing season مجموع بارندگی در طول فصل رشد	59	49
Amount of precipitation during the growing season (mm) مجموع بارندگی در طول فصل رشد	359.4	242.4
Maximum temperature in flowering phase (˚C) دمای حداکثر در مرحله گلدهی	11.89	22.1
Minimum temperature during the growing season (˚C) دمای حداقل در طول فصل رشد	-15.1	-21.29
Average temperature during the growing season (˚C) دمای میانگین در طول فصل رشد	5.84	5.82
The number of occurrences of temperatures above 30 ◦c during the growing season تعداد وقوع دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در طول فصل رشد	11	3
Maximum temperature during the growing season (˚C) دمای حداکثر در طول فصل رشد	33.9	30.7
growth season (day) طول فصل رشد	295	269
Harvest index (%) شاخص برداشت	0.68	0.39
The average yield of the grid (kg ha^{-1}) میانگین عملکرد گرید	3537	2082



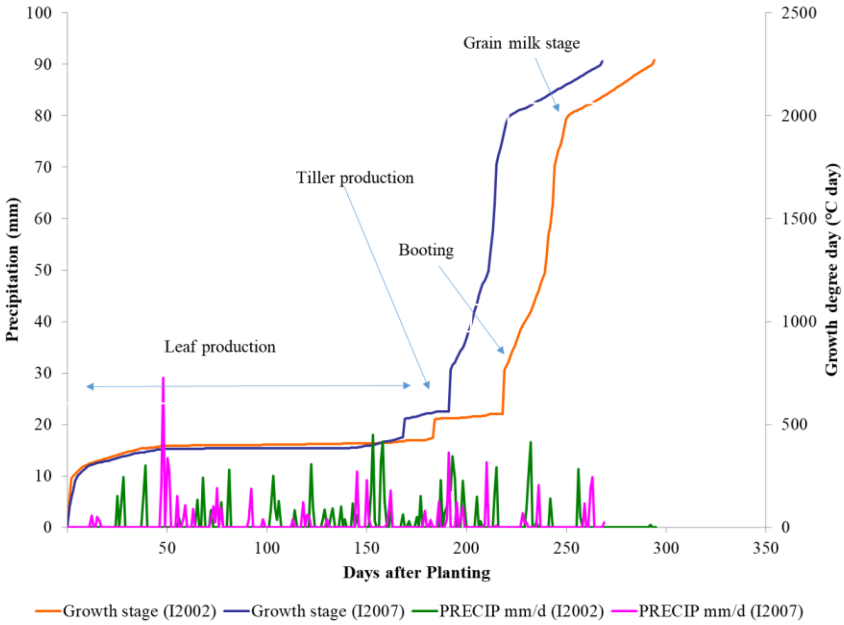
شکل ۵- تغییرات دمای حداکثر و درجه روز رشد مراحل نموی در طول مراحل رشدی گندم آبی بجنورد (گرید ۱۰۹) در سال خوب (۲۰۰۲) و ضعیف (۲۰۰۷)

Figure 5- Changes in maximum temperature and growing degree days of developmental stages during the growing season of irrigated wheat in Bojnord (Grid 109) in the good year (2002) and in the weak year (2007)



شکل ٦- تغییرات دمای حداقل و درجه روز رشد مراحل نموی در طول فصل رشد گندم آبی بجنورد (گرید ۱۰۹) در سال خوب (۲۰۰۲) و ضعیف (۲۰۰۷)

Figure 6- Changes in minimum temperature growth degree days of developmental stages during the growing season of irrigated wheat in Bojnord (Grid 109) in the good year (2002) and in the weak year (2007)



شکل ۷- تغییرات میزان بارندگی و درجه روز رشد مراحل نموی در طول فصل رشد گندم آبی بجنورد (گرید ۱۰۹) در سال خوب (۲۰۰۲) و ضعیف (۲۰۰۷)

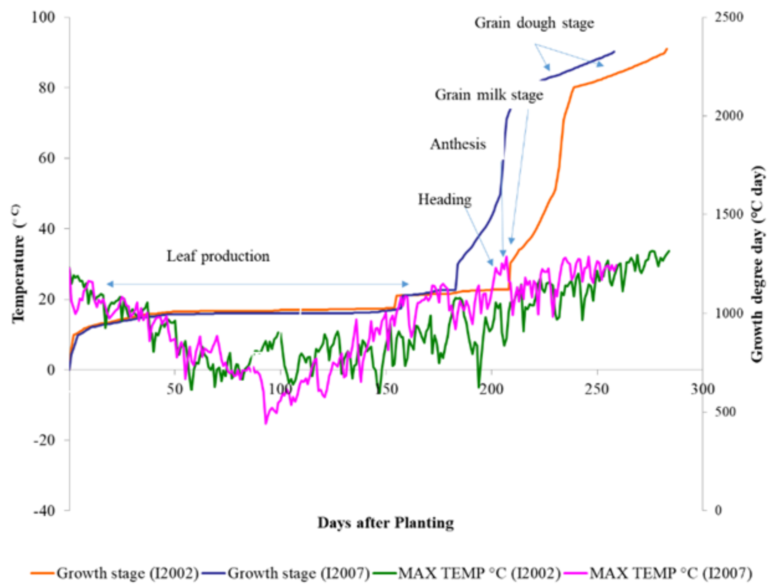
Figure 7- Changes in precipitation growth degree days of developmental stages during the growing season of irrigated wheat in Bojnord (Grid 109) in the good year (2002) and in the weak year (2007)

جدول ۲- مقایسه متغیرهای محیطی مؤثر بر عملکرد گندم آبی بجنورد (گرید ۱۱۰) در سال‌های خوب (۲۰۰۲) و ضعیف (۲۰۰۷) طی دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۰

Table 2- Comparison of environmental variables affecting wheat yield in Bojnord (Grid 110) in good (2002) and weak (2007) years about grain yield during 1980-2017

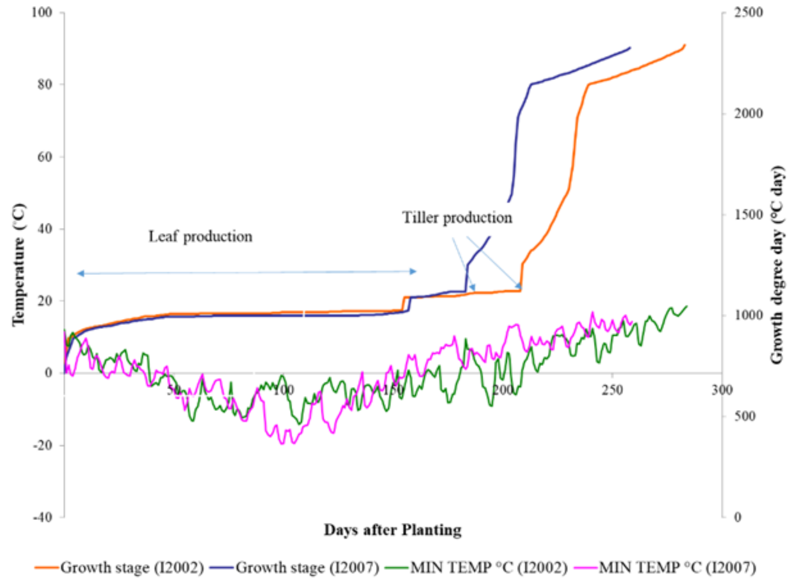
Environmental variable / wheat growth characeristics متغیر محیطی/ ویژگی رشدی گندم	2002 (Good) سال خوب	2007 (Weak) سال ضعیف
Amount of precipitation (mm) during booting to the end of grain milk stage مقدار بارندگی از زمان تورم سنبله تا پایان خمیری نرم	46.1	15.39
Number of precipitations during booting to the end of grain milk stage تعداد دفعات بارندگی از زمان تورم سنبله تا پایان خمیری نرم	7	3
Amount of precipitation in the flowering phase (mm) میزان بارندگی در فاز گلدهی	0	0
Number of precipitation s during the growing season مجموع بارندگی در طول فصل رشد	61	48
Amount of precipitation during the growing season (mm) مجموع بارندگی در طول فصل رشد	335.5	178.4
Maximum temperature in flowering phase (˚C) دمای حداکثر در مرحله گلدهی	22	28.6
Minimum temperature during the growing season (˚C) دمای حداقل در طول فصل رشد	-12.8	-19.6
Average temperature during the growing season (˚C) دمای میانگین در طول فصل رشد	6.76	6.59
The number of occurrences of temperatures above 30 ◦c during the growing season تعداد وقوع دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در طول فصل رشد	18	12
Maximum temperature during the growing season (˚C) دمای حداکثر در طول فصل رشد	26	32
Growth season (day) طول فصل رشد	284	259
Harvest index (%) شاخص برداشت	0.56	0.37
The average yield of the grid (kg ha^{-1}) میانگین عملکرد گرید	4369	2460

وقوع دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۲ نسبت به سال ۲۰۰۷ بیشتر بوده (۱۸ مورد در مقابل ۱۲ مورد)، اما به دلیل زمان وقوع آن در مرحله خمیری سخت، باعث کاهش عملکرد در سال ۲۰۰۲ نشد (شکل ۸). به نظر می‌رسد که دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله خوشه‌دهی (روز ۲۰۵ اُم پس از کاشت) و دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد در مرحله خمیری نرم (روز ۲۰۷ اُم پس از کاشت) در سال ۲۰۰۷، دلیل کاهش عملکرد تا حد ۲۴۶۰ کیلوگرم و شاخص برداشت ۰/۳۷ بوده است (شکل ۸). مطالعه مراحل حساس رشد گندم طی سال‌هایی که بیشترین و کمترین عملکرد در شهرستان بجنورد حاصل شد، حاکی از این است که وقوع دماهای بسیار پایین در مراحل ابتدای رشد و تولید برگ‌های اولیه که مرحله استقرار گیاه است (به‌عنوان مثال ۱۹/۶- درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۷ در گرید۱۱۰)، باعث کاهش سطح فتوسنتزکننده و درنتیجه کاهش شدید عملکرد می‌گردد (شکل ۹). همچنین دماهای بسیار بالا تا حد ۳۰ درجه در مرحله خوشه‌دهی و ۳۲ درجه در مرحله پر شدن دانه یا خمیری نرم (شکل ۸) که معمولا نیز با باد همراه است، کاهش عملکرد را به دنبال خواهد داشت. اگرچه وقوع دماهای بالا در مرحله خمیری نرم باعث افت عملکرد بیشتری نسبت به مرحله خمیری سخت می‌گردد، اما بیشتر بودن فراوانی وقوع دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ درصد) در طول فصل رشد و در مرحله خمیری سخت (۹۴/۷۳ درصد) نسبت به خمیری نرم (۵/۲ درصد) در طی ۳۸ سال درگرید ۱۰۹ شهرستان بجنورد می‌تواند به‌عنوان عوامل تأثیرگذار منفی بر دستیابی به عملکرد بالا در این منطقه به‌حساب آید (جدول ۳). به‌عبارت‌دیگر، چنانچه تاریخ کاشت به دلایل مختلف نظیر عدم تأمین نهاده‌ها (بذر، کود، مکانیزاسیون و غیره) به تعویق افتد، خطر هم‌زمانی مرحله خمیری نرم با دماهای بالا و درنتیجه کاهش شدید میانگین عملکرد گندم در این شهرستان بسیار بالا خواهد بود. همچنین ازآنجاکه خسارت سرما بر گیاه گندم در دماهای پایین‌تر از ۱۱- درجه سانتی‌گراد در طول فصل رشد مطرح هست، فراوانی وقوع این متغیر به میزان ۹۲/۱ درصد از سال‌های موردمطالعه یکی دیگر از محدودیت‌های رشد گندم در این ناحیه است. بنابراین، چنانچه تاریخ کاشت مناسب انتخاب نشود و استقرار و پنجه‌زنی گیاه با تأخیر صورت پذیرد، خسارت سرما باعث کاهش عملکرد خواهد شد.



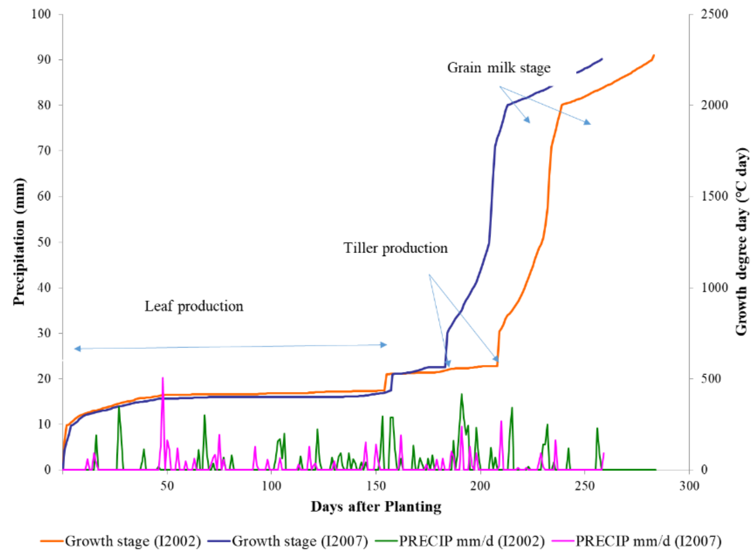
شکل ۸- تغییرات دمای حداکثر در طول فصل رشد گندم آبی بجنورد (گرید ۱۱۰) در سال خوب (۲۰۰۲) و ضعیف (۲۰۰۷)

Figure 8- Changes in maximum temperature and growing degree days of developmental stages during the growing season of irrigated wheat in Bojnord (Grid 110) in the good year (2002) and in the weak year (2007)



شکل ۹- تغییرات دمای حداقل در طول فصل رشد گندم آبی بجنورد (گرید ۱۱۰) در سال خوب (۲۰۰۲) و ضعیف (۲۰۰۷)

Figure 9- Changes in minimum temperature and growing degree days of developmental stages during the growing season of irrigated wheat in Bojnord (Grid 110) in the good year (2002) and in the weak year (2007)



شکل ۱۰- تغییرات میزان بارندگی در طول فصل رشد گندم آبی بجنورد (گرید ۱۱۰) در سال خوب (۲۰۰۲) و ضعیف (۲۰۰۷)

Figure 10- Changes in precipitation and growth degree days of developmental stages during the growing season of irrigated wheat in Bojnord (Grid 110) in the good year (2002) and in the weak year (2007)

آنالیز پنل دیتا

طبق نتایج حاصل از آنالیز پنل دیتا، ۶۳ درصد از تغییرات عملکرد گندم آبی استان در فاصله سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۸۰ توسط عوامل محیطی (دما و بارندگی) و ۳۷ درصد آن توسط عوامل مدیریتی توضیح داده می‌شوند (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). مقایسه متغیرهای محیطی در سطح استان نشان داد که از میان متغیرهای موردبررسی، تعداد دماهای بالاتر از ۳۰˚C (N30TMAX)، دمای میانگین (GSTMEAN)، برهمکنش میزان و دفعات بارندگی (TPRAT×NPRAT) دارای اثر معنی‌دار بر عملکرد گندم آبی هستند ($p \leq 0.05$). طول فصل رشد در تمام مناطق به‌طور معنی‌دار کاهش یافت ($p \leq 0.05$) بود. در تمامی مناطق و در ۱۰۰ درصد سال‌های موردمطالعه، گیاه گندم در مرحله پر شدن دانه (خمیری نرم و خمیری سخت) با دمای بالاتر از ۳۰˚C مواجه بوده است و باعث اثرات مقطعی منفی در فاروج، راز جرگلان، مانه سملقان و جاجرم

شده است. شهرستان بجنورد، شیروان و اسفراین از لحاظ متغیرهای محیطی معنی‌دار (دمای میانگین، تعداد دماهای بالاتر از ۳۰˚C، میزان و تعداد بارندگی در طول فصل رشد) در طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ دارای اثرات ثابت مقطعی مثبت و مناطق فاروج، راز جرگلان، مانه سملقان و جاجرم دارای اثرات ثابت مقطعی منفی بودند.

فراوانی وقوع دماهای بالاتر از ۳۰˚C در تمام مناطق کشت گندم آبی در مرحله خمیری سخت بیشتر از خمیری نرم بوده است، لذا هر اندازه تاریخ کاشت از مهر ماه (تاریخ کاشت رایج مناطق موردمطالعه) به تعویق بیفتد، مرحله خمیری نرم که حساس‌تر هست با دماهای بالا و مرحله تولید برگ‌های اولیه و استقرار گیاه در اوایل فصل رشد با دماهای منفی برخورد کرده و کاهش شدید عملکرد را در پی خواهد داشت.

جدول ۳- فراوانی وقوع متغیرهای محیطی در مراحل رشدی گندم آبی در شهرستان بجنورد (گرید شماره ۱۰۹) طی سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۰

Table 3- Frequency of climatic variables accident during growth stages of irrigated wheat in Bojnord (Grid 109) during 198-2017

Environmental variable متغیر محیطی	Frequency (%) فراوانی (درصد)
N30Tmax (Accident of temperature >30˚C during the growing season) وقوع دماهای بالاتر از ۳۰˚C در طول فصل رشد	100
N30AST (Accident of temperature >30˚C at flowering stage) وقوع دماهای بالاتر از ۳۰˚C در مرحله گلدهی	2.6
N30GMS (Accident of temperature >30˚C at grain milk stage) وقوع دماهای بالاتر از ۳۰˚C در مرحله خمیری نرم	5.2
N30GDS (Accident of temperature >30˚C at grain dough stage) وقوع دماهای بالاتر از ۳۰˚C در مرحله خمیری سخت	94.73
Nprat40-80 (Number of precipitations during booting to the end of grain milk stage) تعداد دفعات بارندگی از زمان تورم سنبله تا پایان خمیری نرم	86.84
NTmin-11(Accident of temperature <-11˚C during the growing season) تعداد دماهای زیر ۱۱˚C- در طول فصل رشد	92.1

مطالعه مراحل حساس رشد گندم طی سال‌های خوب (دارای عملکرد بالای دانه گندم) و سال‌های ضعیف (دارای عملکرد پایین دانه گندم) حاکی از این است که تمامی سال‌های ضعیف، دارای دماهای حداقل پایین‌تر از حد بحرانی (۱۱˚C-) بودند. وقوع دماهای بسیار پایین در مراحل ابتدای رشد و تولید برگ‌های اولیه که مرحله استقرار گیاه است، باعث کاهش سطح فتوسنتزکننده و درنتیجه کاهش شدید عملکرد می‌گردد. همچنین دماهای بسیار گرم تا حد ۳۰˚C در مرحله خوشه‌دهی و ۳۲˚C در مرحله پر شدن دانه یا خمیری نرم که معمولا نیز با باد همراه است، کاهش عملکرد را به دنبال داشته است. طول فصل رشد نیز در تمام مناطق موردمطالعه شیب کاهشی داشت.

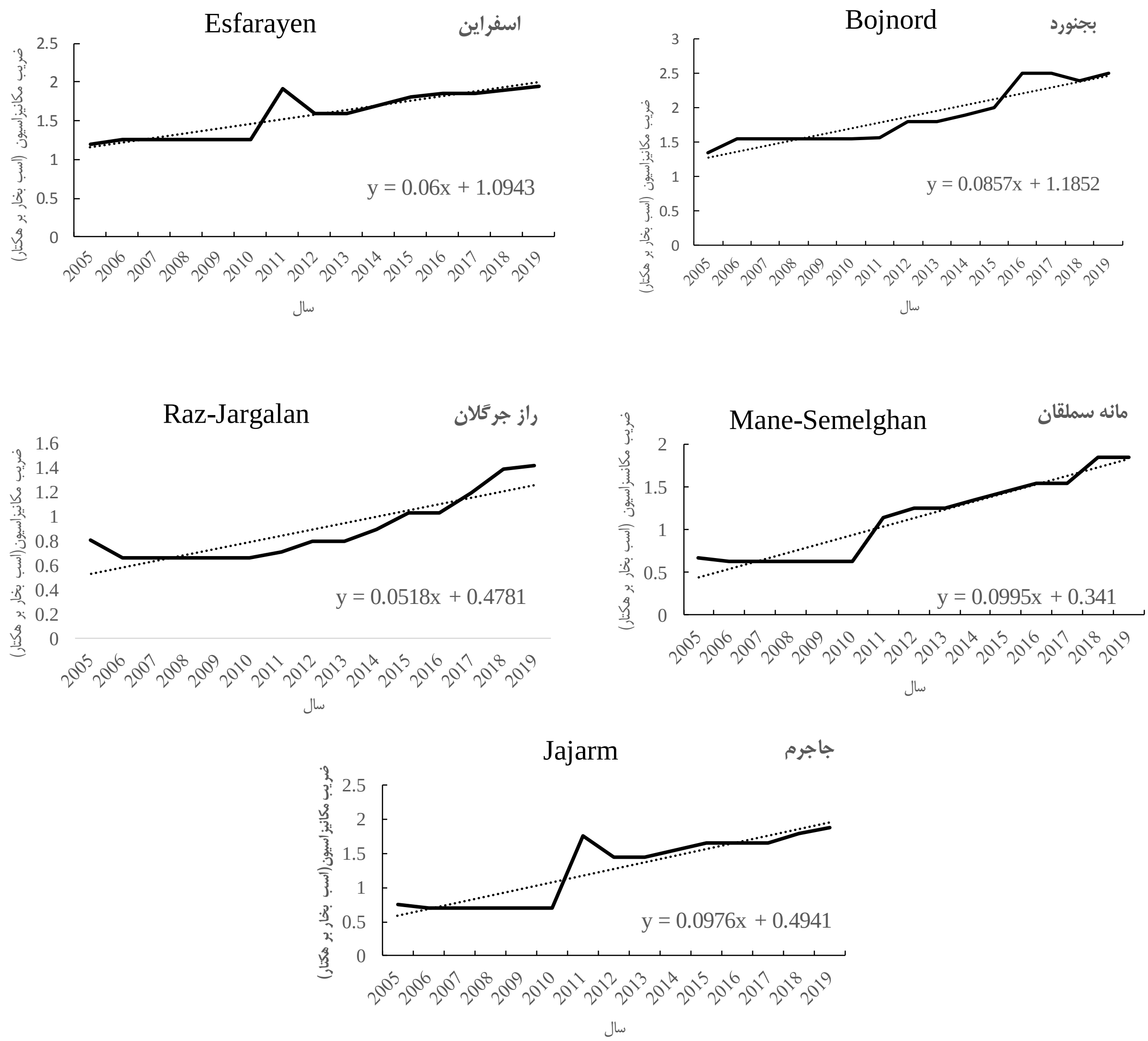
لوبل و بورک (Lobell & Burke, 2010) با استفاده از مدل CERES-Maize و به‌کارگیری سه روش آماری سری‌های زمانی، آنالیز پنلی و آنالیز مقطعی) به همراه تغییرات تاریخی عملکرد ذرت در ۲۰۰ منطقه در جنوب صحرای آفریقا و همچنین اثرات سناریوهای فرضی افزایش دما به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۲۰ درصدی بارندگی، عملکرد ذرت را شبیه‌سازی و در ادامه کارایی سه روش آماری را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج این بررسی نشان داد که عملکرد مدل‌های آماری بر اساس متغیرهای اقلیمی و مقیاس مکانی متفاوت است. مدل‌های آماری سری زمانی می‌توانند پاسخ عملکردی یک مکان خاص به تغییرات بارش را بازتولید کنند، اما برای پاسخ‌های دما کارایی کمتری دارند. در مقابل، مدل‌های آماری که بر اطلاعات چندین سایت متکی بودند، یعنی مدل‌های پنل و مقطعی، در پیش‌بینی پاسخ‌ها به تغییر دما بهتر از تغییر بارش بودند. مدل‌های مبتنی بر مکان‌های متعدد نیز حساسیت کمتری نسبت به طول دوره تاریخی مورداستفاده جهت واسنجی مدل داشتند.

عوامل مدیریتی مؤثر بر روند طولانی‌مدت عملکرد گندم آبی

سرعت افزایش عملکرد در شهرستان‌های بجنورد (در فاصله سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۰)، ۱۲/۶۳ کیلوگرم در هکتار در سال (معادل ۰/۴۸ درصد) بوده است که در طول ۳۰ سال (۲۰۰۹-۱۹۸۰)، ۱۴/۴درصد از ۳۷ درصد سهم عوامل مدیریتی، تحقق پیدا کرده است. به همین ترتیب "درصد افزایش سالیانه عملکرد" و "درصد تحقق سهم مدیریت" در شهرستان‌های اسفراین، شیروان، راز جرگلان، فاروج، جاجرم و مانه سملقان به‌ترتیب (۰/۴۳ و ۱۲/۹ درصد)، (۰/۱۶ و ۴/۸ درصد)، (۰/۱۹ و ۵/۷ درصد)، (۰/۰۵ و ۱/۵)، (۰/۰۵ و ۱/۵) و (۰/۰۳ و ۰/۹ درصد) بود.

روند مثبت شاخص‌هایی نظیر درجه مکانیزاسیون، ضریب

مکانیزاسیون، مبارزه با علف‌های هرز، استفاده از بذر اصلاح‌شده و غیره ارتباط زیادی با افزایش سهم مدیریت در آن مناطق نداشت. به‌عنوان مثال، اگرچه ضریب مکانیزاسیون فاروج و درجه مکانیزاسیون جاجرم از سایر مناطق بالاتر بود (شکل ۱۱)، اما لزوماً سهم مدیریت مزارع گندم آبی در این منطقه از سایر مناطق بیشتر نبود. بنابراین، علی‌رغم وجود مزارع مکانیزه با عملکرد بالا در یک منطقه، وجود مزارعی که از کمترین امکانات و نهاده‌ها و درنتیجه کمترین مدیریت زراعی برخوردارند، سبب کاهش میانگین شهرستان می‌گردد. به همین دلیل توزیع عادلانه نهاده‌ها و انتقال دانش فنی به همه مزارع یک منطقه می‌تواند در افزایش سهم مدیریت آن منطقه و سازگاری با عوامل نامساعد محیطی تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال، در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸، علی‌رغم وجود بذر اصلاح‌شده در استان، به دلیل عدم تطابق منطقی قیمت بذر گواهی‌شده با قیمت خرید تضمینی محصول گندم، اکثر شرکت‌های تولید بذر، از توزیع بذر امتناع نمودند و این امر باعث سرگردانی کشاورزان، کشت دیرهنگام و درنهایت کاهش سطح کشت‌شده با بذور گواهی‌شده گردید.



شکل ۱۱- مقایسه ضریب مکانیزاسیون مناطق مختلف استان خراسان شمالی در فاصله سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹

خط پیوسته میانگین سالانه و خط نقطه‌چین، برازش رگرسیونی را نشان می‌دهد.

Figure 11- Coefficient of mechanization across north Khorasan province during 2005-2019

Bold and dotted lines indicate the annual averaged and regression, respectively.

با توجه به اهمیت تغذیه گندم به‌خصوص در مراحل ابتدای رشد و استقرار گیاه و نیز در مراحل حساس رشدی (Cao *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2018; Ram & Govindan, 2020) به‌عنوان عامل مقاومتی مؤثر در برابر نوسانات محیطی، انجام آزمایش خاک و توصیه‌های کودی باعث مصرف بهینه نهاده‌ها و حفظ محیط‌زیست می‌گردد. یکی از راه‌های افزایش عملکرد استفاده از ساب سویلر[1] یا زیرشکن است. اگرچه اقبال کشاورزان به دلیل اقدامات ترویجی در سال‌های اخیر برای استفاده از این ابزار زیاد شده است اما به دلیل سخت بودن زمین، استفاده از آن فقط در صورت داشتن تراکتورهای پرقدرت مانند تراکتورهای شش سیلندر (با قدرت ۱۷۰ اسب بخار) امکان‌پذیر است.

نتیجه‌گیری

در تمامی نواحی و در تمام سال‌های موردمطالعه، گندم در مرحله پر شدن دانه (خمیری نرم و خمیری سخت) با دمای بالاتر از ۳۰°C مواجه بود، لذا هر اندازه که تاریخ کاشت از مهر ماه (تاریخ کاشت رایج در مناطق موردمطالعه) به تعویق افتد، مرحله تولید برگ‌های اولیه و استقرار گیاه در اوایل فصل رشد با دماهای منفی و مرحله خمیری نرم با دماهای بالا برخورد کرده و کاهش شدید عملکرد را در پی خواهد داشت. مقایسه سال‌های خوب و ضعیف، بیانگر نقش مثبت بارندگی در افزایش عملکرد است. با توجه به تأثیر منفی کاهش بارندگی و هم‌زمان افزایش دما در طول فصل رشد، تأمین آب موردنیاز گیاه اهمیت زیادی دارد، به‌خصوص در شهرستان‌های فاروج، مانه سملقان، راز جرگلان و جاجرم که متغیرهای محیطی دما و بارندگی دارای اثرات مقطعی منفی بودند. بنابراین، توسعه سیستم‌های آبیاری نوین و سرمایه‌گذاری در این زمینه به‌عنوان متغیر محیطی تأثیرگذار بر عملکرد، همچنین توزیع عادلانه نهاده‌ها از قبیل کود، بذر اصلاح‌شده، ماشین‌آلات و فراهم آوردن امکان دسترسی به آن‌ها می‌تواند نویدبخش حفظ و یا بهبود عملکرد باشد. اگرچه، سیاست‌های مالی-حمایتی، ابزاری دولتی برای کنترل بازار است، اما در مواقعی بر دسترسی کشاورزان به نهاده‌ها اثر منفی می‌گذارد. به‌طورکلی، نتایج این تحقیق نشان داد که با به‌کار بستن شیوه‌های مدیریتی مؤثر، به‌ویژه انتخاب تاریخ کاشت مناسب به‌منظور تطابق بهتر مراحل فنولوژی گندم با شرایط محیطی، می‌توان در جهت بهبود عملکرد گندم در استان خراسان شمالی اقدام نمود.

References

1. Amjath-Babu, T. S., Krupnik, T. J., Aravindakshan, S., Arshad, M., & Kaechele, H. (2016). Climate change and indicators of probable shifts in the consumption portfolios of dryland farmers in Sub-Saharan Africa: Implications for policy. *Ecological Indicators*, *67*, 830-838. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.030
2. Andarzian, B., Bakhshandeh, A. M., Bannayan, M., Eman, Y., Fathia, G., & Alami Saeed, K. (2008). WheatPot: a simple model for spring wheat yield potential using monthly weather data. *Biosystem Engineering*, *99*, 487-495. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.008
3. Arshad, M., & Krupnik, T. S. A. T. J. (2016). Climate variability and yield risk in South Asia's rice-wheat systems: emerging evidence from Pakistan. https://doi.org/10.1007/s10333-016-0544-0
4. Arun, G., & Ghimire, K. (2019). Estimating post-harvest loss at the farm level to enhance Food Security: A Case of Nepal. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, *3(September)*, 127-136. https://doi.org/10.31015/jaefs.2019.3.3
5. Asseng, S., Foster, I., & Turner, N. (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology*, *17*(2), 997-1012. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x
6. Bannayan, M., & Eyshi Rezaei, E. (2012). Future production of rainfed wheat in Iran (Khorasan province): Climate change scenario analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 211-227. https://doi.org/10.1007/s11027-012-9435-x
7. Bannayan, M., Kobayashi, K., Marashi, H., & Hoogenboom, G. (2007). Gene-based modeling for rice: an opportunity to enhance the simulation of rice growth and development? *Journal of Theoretical Biology*, *249*, 593-605. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2007.08.022
8. Bannayan, M., Pooya Nasab, K., Ghorbani, R., & Yaghoobi, F. (2018). Temporal and Spatial Variation of Wheat and Beans Yield, Case Study: Khorasan Razavi. *Iranian Journal of Field Crops Research 16*(2), 263-282. (in Persian). https://doi.org/10.22067/gsc.v16i2.44536
9. Bannayan, M., Sanjani, S., & Alizadeh, A. (2010). Association between climate indices aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. *Field Crops Research*, *118*, 105-114. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.04.011
10. Batjes Niels, H. (2012). ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grid. January 2012.

1- Sub-soiler

Retrieved from http://www.isric.org/sites/default/files/isric_report_2012_01.pdf
11. Bosilovich, M. G., Akella, S., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Gelaro, R., Kovach, R., Liu, Q., Molod, A., Norris, P., Wargan, K., Chao, W., Reichle, R., Takacs, L., Vikhliaev, Y., Bloom, S., Collow, A., Firth, S., Labow, G., & Koster, R. D. (2015). Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, Volume 43 MERRA-2: Initial Evaluation of the Climate. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, 43(November).
12. Boskabadi, E., Kohansal, M. R., & Ghorbani, M. (2022). *How does climate change affect the wheat production in Mashhad?* In proceeding of: The 8th Iranian Agricultural Economics Society (IAES). Retrieved from https://profdoc.um.ac.ir/articles/a/1027955.pdf
13. Calderini, D. F., & Slafer, G. (1998). Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Research*, *57*, 335-347. https://doi.org/10.1016/s0378-4290(98)00080-x
14. Cao, H., Wang, Z., He, G., Dai, J., Huang, M., Wang, S., & Malhi, S. S. (2017). Tailoring NPK fertilizer application to precipitation for dryland winter wheat in the Loess Plateau. *Field Crops Research*, *209*, 88-95. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.04.014
15. Cassman, K. G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *96*(11), 5952-5959. https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952
16. Curtis, T., & Halford, N. G. (2014). Food security: The challenge of increasing wheat yield and the importance of not compromising food safety. *Annals of Applied Biology*, *164*(3), 354-372. https://doi.org/10.1111/aab.12108
17. Eyshi Rezaei, E., & Lashkari, A. (2019). The consequences of change in management practices on maize yield under climate warming in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, *137*, 1001-1013. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2637-8
18. Fallah, M. H., Nezami, A., Khazaie, H. R., & Nassiri Mahallati, M. (2021). Evaluation of DSSAT-Nwheat Model across a Wide Range of Climate Conditions in Iran. *Journal of Agroecology*, *12*(4), 561-580. https://doi.org/10.22067/jag.v12i4.77250
19. Farhadi, M., Jahan, M., & Bannayan, M. (2021). Investigation of validity and the possibility of using AgMERRA networked dataset in North Khorasan province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *19*(2), 201-217. (in Persian). https://doi.org/10.22067/jcesc.2021.69532.1044
20. Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., Wang, D., & Madani, K. (2013). Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, *442(November)*, 405-419. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.029
21. Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, R. W., Batcheloro, W. D., Hunt, L. A., Boot, K. J., Singh, U., Uryasev, O., Bowen, W. T., Gijsman, A. J., du Toit, A., White, J. W., & Tsuji, G. Y. (2010). Decision support system for Agro-technology Transfer Version 4.5 [CD- ROM]. University of Hawaii, Honolulu, HI.
22. Iizumi, T., & Ramankutty, N. (2016). Changes in yield variability of major crops for 1981-2010 explained by climate change. *Environmental Research Letters 11*(3). https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034003
23. Jahan, M., & Nassiri Mahallati, M. (2022). Modeling the Response of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Growth and Development to Climate Change under Deficit Irrigation in a Semi-arid Region. *PLOS Climate*, *1*(6), e0000003. https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000003
24. Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2016). Climate Change Effects on Agricultural Production of Iran: II. Predicting Productivity of Field Crops and Adaptation Strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *14*(1), 1-20. (in Persian). https://doi.org/10.22067/gsc.v14i1.51157
25. Lashkari, A., Bannayan, M., Koochaki, A., Choi, Y. S., & Park, S. K. (2016). Applicability of AgMERRA forcing dataset forgap-filling of in-situ meteorological observation, Case Study: Mashhad Plain. *Journal of Water and Soil 29*(6), 1749-1758.
26. Lobell, D. B., & Burke, M. B. (2010). On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(11), 1443-1452. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008
27. Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters 2*(1), 7. https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002
28. Nassiri Mahallati, M., & Jahan, M. (2020). Using the AquaCrop model to simulate sesame performance in response to superabsorbent polymer and humic acid application under limited irrigation conditions. *International Journal of Biometeorology*, *64*(12), 2105-2117. https://doi.org/10.1007/s00484-020-02001-z
29. Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., & Robertson, R. (2009). Climate Change Impact on Agriculture and Costs of Adaptation. Title. Washington, DC: Int. Food Policy Res. Inst. http://doi.org/10.2499/0896295354
30. Poole, N. (2005). Cereal Growth Stages Guide (Issue 2). Retrieved from https://grdc.com.au/__data/assets/pdf_file/0031/364594/Cereal-growth-stages.pdf%0Ahttps://grdc.com.au/uploads/documents/GRDC Cereal Growth Stages Guide1.pdf VN - readcube.com

31. Ram, S., & Govindan, V. (2020). Improving Wheat Nutritional Quality through Biofortification. In: Igrejas G., Ikeda T., Guzmán C. (eds) Wheat Quality For Improving Processing And Human Health. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3_9
32. Ray, D. K., Gerber, J. S., Macdonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, *6*, 1-9. https://doi.org/10.1038/ncomms6989
33. Raymundo, R., Asseng, S., Robertson, R., Petsakos, A., Hoogenboom, G., Quiroz, R., Hareau, G., & Wolf, J. (2018). Climate change impact on global potato production. *European Journal of Agronomy 100*(November 2016), 87-98. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.008
34. Ruane, A. C., Goldberg, R., & Chryssanthacopoulos, J. (2015). Climate forcing datasets for agricultural modeling: merged products for gap-filling and historical climate series estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, *200*, 233-248. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.016
35. Sanjani, S., Bannayan, M., & Kamyabnejad, M. (2011). Detection of recent climate change using daily -temperature extremes in Khorasan Province, Iran. *Climate Research 49*(3), 247-254. https://doi.org/10.3354/cr01031
36. Shifteh somee, B., Ezani, A., & Tabari, H. (2012). Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. *Atmospheric Research*, *113*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.016
37. Soler, C. M. T., Sentelhas, P.C., & Hoogenboom, G. (2007). Application of the CSM-CERES-Maize model for sowing date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, *27*, 165-177. https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.03.002
38. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., & Miller, H. (2007). Climate Change 2007: governmental Panel on Climate Change The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://doi.org/10.1256/wea.58.04
39. Valizadeh, J., Ziaei, S. M., & Mazloumzadeh, S. M. (2014). Assessing climate change impacts on wheat production (a case study). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science 13*(2), 107-115. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.02.002
40. Van Wart, J., Grassini, P., Yang, H., Claessens, L., Jarvis, A., & Cassman, K. G. (2015). Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, *209-210*, 49-58. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.020
41. Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'Donnell, J., & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, *90* (C5), 8995. https://doi.org/10.1029/jc090ic05p08995
42. Yaghoubi, F., Bannayan, M., & Asadi, G. A. (2020). Performance of predicted evapotranspiration and yield of rainfed wheat in the northeast Iran using gridded AgMERRA weather data. I*nternational Journal of Biometeorology*, *64*, 1519-1537. https://doi.org/10.1007/s00484-020-01931-y
43. Yan, F., Sun, Y., Hui, X., Jiang, M., Xiang, K., Wu, Y., & Jun, M. (2019). The effect of straw mulch on nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use in hybrid rice. *Paddy and Water Environment*, *17*, 23-33. https://doi.org/10.1007/s10333-018-0680-9